

0- 772731

На правах рукописи



ТЮНИНА Светлана Геннадьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ВНУТРЕННИХ
ГРАВИТАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ
МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ**

25.00.29- Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Троицк - 2008

**Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)**

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Молотков Иван Анатольевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
академик РАН Маслов Виктор Павлович

доктор физико-математических наук
Гивишвили Гиви Васильевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт Космических Исследований РАН

Защита состоится " 2 " декабря 2008 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при ИЗМИРАН по адресу: 142190 г. Троицк Московской области, ИЗМИРАН (Проезд от ст. метро "Тёплый стан" авт. № 531, 508, 512, 515 или 398 до остановки "ИЗМИРАН").

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН

Автореферат разослан "31" октября 2008 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.237.01

доктор физико-математических наук

 Михайлов Ю.М.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000510610

Общая характеристика работы

В диссертационной работе методами нелинейной динамики исследуются внутренние гравитационные волны (ВГВ) и гравитационные шумоподобные колебания.

Актуальность темы

Динамика ионосферы в целом определяется совокупностью всех движений в их нелинейном взаимодействии. Изменчивость параметров ионосферы и волновода Земля-ионосфера, существенно зависят от волновых возмущений на ионосферных высотах. В частности, на метеорных высотах (80-110 км) выделяют как линейные, так и нелинейные движения. К линейным и квазилинейным волнам относят преобладающий ветер, приливы, линейные ВГВ. В данном случае под внутренними гравитационными волнами понимают распространяющиеся во времени колебания плотности, давления, температуры и скорости воздуха внутри атмосферы, обусловленные гравитационными полями Земли и Луны. Периоды ВГВ от 10 минут до 24 часов, длины волн от 100 м до 1000 км. Менее изучены нелинейные движения, такие как нелинейные ВГВ, турбулентность и гравитационные шумоподобные колебания, представляющие собой детерминированный хаос гравитационной природы.

Объективная необходимость исследования внутренних гравитационных волн и шумоподобных колебаний в метеорной зоне обусловлена множеством различных задач, касающихся изучения волновых возмущений в ионосфере. Теоретической моделью исследуемых процессов служит обобщённое уравнение КП-класса (Кадомцева–Петвиашвили) с произвольным показателем нелинейности для скорости нейтральной компоненты газа в атмосфере, имеющее решения, в частности, в виде нелинейных ВГВ и решения, соответствующие сложной динамике и хаосу.

Особый интерес представляют шумоподобные колебания как незатухающие апериодические колебания, напоминающие случайный процесс. Шумоподобные колебания в настоящее время считаются нормой динамического поведения нелинейных физических систем, в отличие от шума

как помехи в информационной передаче.

В последние годы все большее число работ посвящено исследованию и прогнозированию временных рядов с использованием теории динамических систем. Временной ряд значений скорости ветра характеризует движение (процесс) в ионосфере, после соответствующей обработки можно с большой точностью произвести оценку будущего значения временного ряда, что важно для решения задач, связанных с исследованиями динамики ионосферы. В связи с этим значительный интерес представляет определение характеристик временных рядов скорости ветра: показателя Хёрста, автокорреляционной функции, корреляционной размерности.

Цель диссертационной работы

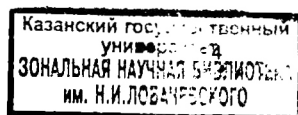
Классификация четырёхмерных состояний равновесия обобщенного уравнения КП, моделирующего различные типы внутренних колебаний и волн. Получение важных физически значимых решений обобщенного уравнения КП, описывающего динамику нелинейных волновых возмущений в ионосфере, построение фазовых портретов, классификация решений обобщенного уравнения КП. Обнаружение шумоподобных колебаний (динамического хаоса) среди решений обобщенного уравнения КП. Выявление динамического хаоса во временных рядах скорости ветра.

Методы исследования

Решение поставленных задач базируется на методах нелинейной динамики.

Во II главе получение результатов обусловлено как широким применением методов качественного анализа, так и разработкой нового методического приёма – разделений на блоки четырёхмерных нелинейных систем – к изучению модели нелинейных волн.

В III главе при обработке временных рядов использовался метод нормированного размаха (R/S метод) или метод Хёрста. Корреляционная размерность определяется методом расчёта корреляционного интеграла.



Достоверность полученных результатов обусловлена использованием точных математических методов анализа решений обобщённого уравнения КП и соответствующих этим решениям фазовых траекторий. Используются надёжные методы нелинейной динамики. Теоретические результаты по динамическому хаосу хорошо согласуются с результатами обработки временных рядов для скорости ветра.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Классификация четырёхмерных состояний равновесия обобщённого уравнения Кадомцева – Петвиашвили, моделирующего различные типы внутренних колебаний и волн.

2. Фазовые портреты для ряда физически актуальных частных случаев уравнения КП. Эффективность способа изображения многомерных фазовых портретов исследуемого уравнения в проекциях на взаимно перпендикулярные плоскости.

3. Классификация решений обобщённого уравнения КП по типу соответствующих им фазовых траекторий. Новые, ранее неизвестные, типы решений этого уравнения.

4. Существование решений обобщённого уравнения КП, соответствующих детерминированному хаосу (шумоподобным колебаниям).

5. Наличие детерминированного хаоса во временных рядах скорости ветра в нижней ионосфере.

Научная новизна

Впервые показано, что обобщённое уравнение КП, описывающее динамику нелинейных волновых возмущений в ионосфере, имеет решения, соответствующие динамическому хаосу.

Предложен новый способ построения многомерных фазовых портретов (в проекциях) и впервые построены четырёхмерные фазовые портреты для частных случаев обобщённого уравнения КП. Установлено соответствие ряда четырёхмерных фазовых траекторий конкретным типам нелинейных волн,

таким как солитоны с отрицательной полярностью, солитоны с гладкими и осциллирующими “хвостами”. Построена классификация четырёхмерных состояний равновесия уравнений класса Кадомцева – Петвиашвили (КП).

Впервые составлена классификация решений обобщённого уравнения КП по типу фазовых траекторий.

Рассчитаны коэффициенты нелинейности и дисперсии в обобщённом уравнении КП для ионосферы. Соотношение нелинейного и дисперсионного членов показывает наличие слабой дисперсии. Новым результатом является также вычисление важнейших характеристик временных рядов скорости ветра: корреляционной размерности, автокорреляционной функции. Рассчитан показатель Хёрста для ряда случаев северного и западного ветра.

Теоретическая и практическая ценность работы

Результаты проведённых исследований важны для понимания сложной динамики волновых возмущений в ионосфере. Эти расчёты показывают присутствие динамического хаоса в обсуждаемых временных рядах. Именно методы нелинейной динамики, позволяющие определить важнейшие характеристики временного ряда скорости ветра, позволяют прогнозировать будущие значения и динамику временного ряда.

Применение изложенных методов исследования обобщённого уравнения КП, возможно, окажется эффективным при решении широкого круга задач. Например, при изучении решений и интерпретации многомерных фазовых портретов более сложных неоднородных модельных уравнений.

Личный вклад автора

В целях исследования решений обобщённого уравнения КП автором предложен новый способ изображения многомерных фазовых портретов в проекциях на взаимно перпендикулярные плоскости, составлена классификация четырёхмерных состояний равновесия, по аналогии с известной классификацией трёхмерных состояний равновесия.

Построены четыре четырёхмерных (в проекциях) фазовых портрета для частных случаев обобщённого уравнения КП, при значениях коэффициентов

$\mu = \delta = 0, \gamma > 0, \beta = 0, \pm 1$. Для трёхмерного случая выявлены типы особых точек. Обобщение для произвольных коэффициентов и расчёт асимптотик выполнены совместно с В.Ю. Белашовым.

Показано, что обобщённое уравнение КП в случае учёта диссипации и неустойчивости имеет решения, соответствующие сложной динамике и хаосу. Составлена классификация решений обобщённого уравнения КП по типу фазовой траектории.

В п.3.2 и п.3.3 автором изучены временные ряды, предоставленные Р.А. Ишмуратовым. Здесь автору принадлежит исследование детерминированного хаоса во временных рядах скорости ветра для нижней ионосферы. Вычислены важнейшие характеристики временных рядов скорости ветра: корреляционная размерность, автокорреляционная функция и показатели Хёрста для разных месяцев. Построены графики, отражающие динамику показателя Хёрста.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на объединённом семинаре теоретического отдела, лаборатории моделирования волновых полей в ионосфере и лаборатории низкочастотных излучений и электромагнитной совместимости ИЗМИРАН от 7.11.2006 г., а также на следующих конференциях:

- “Международное сотрудничество и образование молодёжи на Севере”: I международная научно-практическая конференция студентов и молодых исследователей 1996 г., Магадан

- “Идеи, гипотезы, поиск”: III научная конференция аспирантов 1996 г., Магадан

- “Северо-Восток России”: Региональная научная конференция “Северо-Восток России” 1998 г., Магадан

- Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по физике 2003 г., Владивосток

Материалы третьей главы диссертации использовались в спецкурсе

“Временные ряды” в физике, для студентов СВГУ специальности “физика и информатика”.

Публикации: Автором опубликовано 10 работ, по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в журналах, входящих в список ВАК, опубликовано 3 работы. Объем публикаций по теме диссертации составляет 32 страницы.

ОБЪЁМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, приложения и списка литературы. Работа содержит 100 страниц машинописного текста, 21 рисунок, 3 таблицы и библиографию из 70 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цель, задачи и положения, выносимые на защиту. Кратко изложена структура и содержание работы, даётся характеристика научной новизны и практической значимости результатов.

Первая глава содержит основные уравнения, методы и их приложения к исследованию нелинейных ВГВ и динамического хаоса. В **п. 1.1** представлен краткий обзор литературы по распространению ВГВ в ионосфере. Развитие теории нелинейных волн, описываемых обобщёнными уравнениями КдВ (Кортвега де Вриза) и КП и вывод обобщённого уравнения КП рассматриваются в **п.1.2**. Методы качественного исследования нелинейных динамических систем, применяемые в диссертационной работе, рассмотрены в **п.1.3**. Динамический хаос во временных рядах рассматривается в **п.1.4**. Представленный обзор работ показывает актуальность исследований динамики скорости ветра в ионосфере, при этом значительный интерес представляет применение методов нелинейной динамики для исследования временных рядов скорости ветра.

Вторая глава содержит результаты, получаемые при работе с теоретической моделью - обобщённым уравнением КП, описывающим нелинейные волны, солитоны и аperiодические шумоподобные колебания в

ионосфере. Исследуется обобщённое уравнение КП, построены фазовые портреты, качественное исследование сопоставляется с результатами численных решений. В 2.1 развивается метод исследования качественной структуры окрестностей простых четырёхмерных состояний равновесия, характерных для обобщённого уравнения КП-класса. Метод построения фазовых портретов нелинейных систем дополняется исследованием точек перегиба, максимума и минимума. Адекватно истолковывается структура нелинейных волн, описывающихся уравнением типа КП, факторами качественной теории. Устанавливается число состояний равновесия у данной динамической системы, их устойчивость, существование замкнутых траекторий, их количество и расположение. Трёхмерное обобщённое уравнение КП сводится к трём одномерным уравнениям поворотом осей и соответствующим преобразованием декартовых прямоугольных координат. Геометрически такое преобразование означает поворот координатных осей на 45° и уменьшение масштаба в $\sqrt{2}$ раз. После перехода к бегущей координате и интегрирования возникают обыкновенные дифференциальные уравнения четвёртого порядка, которые связаны между собой преобразованием координат, каждое уравнение эквивалентно системе четырех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

В п.2.2 исследуются асимптотики и структура нелинейных волн и солитонов в средах со слабой дисперсией с учетом высшей дисперсионной поправки. Полученные в п.2.1 системы уравнений разложены на две подсистемы размерности 2. Соответствующий фазовый портрет изображается в проекциях на две взаимно перпендикулярные фазовые плоскости, что вполне позволяет отразить тип особых точек и отдельные траектории, соответствующие линейным и нелинейным волнам. В результате такого анализа решений в фазовом пространстве и асимптотического анализа выделяются различные классы решений обобщённого уравнения КП. Эта часть работы была выполнена совместно с В. Ю. Белашовым.

В п.2.3 составлена классификация решений обобщённого уравнения КП.

При изучении структуры и эволюции нелинейных внутренних гравитационных волн возникает необходимость определения всех возможных типов волн. Впоследствии выбранный тип волны может исследоваться как численными так и аналитическими методами. Качественное и асимптотическое исследование позволяет классифицировать различные типы волн по виду фазовой траектории, поскольку структура волны описывается именно фазовой траекторией. Однако в исследуемом общем случае невозможно найти интегралы энергии и сопоставить им кривые на фазовой плоскости. Поэтому далее применяются другие методы качественного исследования, проводится сопоставление полученных результатов с результатами асимптотических и численных методов. Для нелинейных систем качественное интегрирование или исследование качественной структуры, в целом ставит задачу исследования интересующих нас свойств решений динамической системы, в том числе и аналитическими методами. Устанавливается число состояний равновесия для данной динамической системы, устойчивость этих состояний, существование замкнутых траекторий, их количество и расположение. Вследствие линеаризуемости системы вблизи особых точек удаётся получить выражения для асимптотик этих решений.

В диссертации выделены следующие новые классы решений обобщённого уравнения КП:

Класс решения	Фазовая траектория
<i>солитоны с гладкими асимптотиками</i>	сепаратрисная петля четырёхмерного седло – центра, охватывающая фокус
<i>солитоны с отрицательной полярностью</i>	сепаратрисная петля четырёхмерного седло – центра, охватывающая другой седло – центр; сепаратриса петли выходит в отрицательном направлении

<i>солитоны с осциллирующими асимптотиками</i>	сепаратрисная петля четырёхмерного седло – центра, входящая в четырёхмерный фокус
--	---

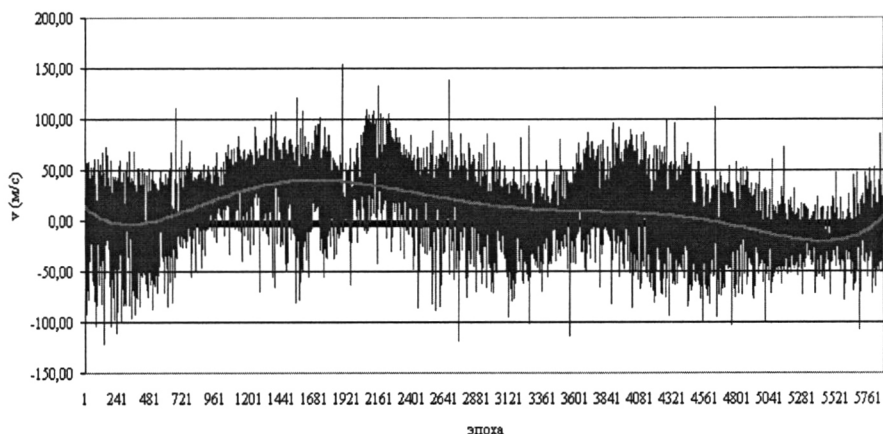
Эти решения подтверждены асимптотическими и численными исследованиями.

Полный же перечень известных к настоящему времени решений обобщённого уравнения КП, полученных разными авторами, как правило, качественно или численно, приведён во второй главе диссертации.

Рассмотрен частный случай обобщённого уравнения КП, которому соответствует сложная динамика и хаос. Установление существования сложной динамики и детерминированного хаоса опирается, в частности, на теорему Шильникова о петле сепаратрисы седлофокуса [1]. В случае седлофокуса матрица линеаризации имеет одно действительное собственное число λ и два комплексно-сопряжённых $\lambda_{1,2} = p \pm i\omega$. Как показал Шильников, в случае $\frac{\lambda}{|p|} > 1$ наличие петли седлофокуса означает существование сложной динамики и хаоса. Смысл этого неравенства заключается в том, что в фазовом пространстве системы скорость ухода от неподвижной точки по неустойчивому направлению преобладает над скоростью приближения по устойчивым направлениям.

Наиболее важен случай $\beta = \gamma = 0$ в обобщённом уравнении КП (диссипативные уравнения с неустойчивостью), приводящий к принципиально новому типу решений. После соответствующих расчётов получаем $\frac{\lambda}{|p|} = 2$, следовательно, при $\beta = \gamma = 0$ существует сложная динамика и хаос.

Такие решения экспериментально обнаруживаются при исследовании структуры временных рядов скорости ветра в ионосфере. Сложная динамика и хаос реализуются в экспериментальных данных в виде шумоподобных колебаний (незатухающие апериодические колебания, напоминающие случайный процесс), как это показано в **Главе 3**.



В п.3.1 диссертации рассчитаны коэффициенты в обобщённом уравнении КП для ионосферы. Оценен относительный вклад в искажение формы волны нелинейного и дисперсионного членов. Для оценки использован гармонический процесс $u = u_0 \sin(\omega \xi)$. В п.3.2 и п.3.3 установлено явление детерминированного хаоса во временных рядах скорости ветра в ионосфере. Данные скорости ветра получены по измерениям дрейфа метеорных следов азимутальным радиолокационным методом. Метеорные следы отклоняются ветровыми движениями, скорость и направление движения метеорных следов и воздушных масс совпадают.

На Рис. построен график горизонтальной скорости ветра. Линия тренда – результат аппроксимации полиномом 6-ой степени.

В соответствии с изложенными теоретическими результатами экспериментальные данные также обнаруживают шумоподобные апериодические колебания.

В п.3.2 и п.3.3 вычислены характеристики временных рядов скорости ветра: показатель Хёрста, корреляционная размерность. Построены автокоррелограмма, зависимость нормированного размаха для расчёта показателя Хёрста, аттрактор (траектория в фазовом пространстве), графики

динамики показателя Хёрста для северного и западного ветра. Величина показателя Хёрста указывает на трендоустойчивость временного ряда, т. е. возможно прогнозирование будущих значений временного ряда.

Характеристики временных рядов скорости ветра получены методами нелинейной динамики с помощью программы [2].

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. Построена классификация четырёхмерных состояний равновесия уравнений класса Кадомцева – Петвиашвили (КП).

2. Построены фазовые портреты для ряда физически актуальных частных случаев уравнения КП. Предложен способ изображения многомерных фазовых портретов в проекциях на взаимно перпендикулярные плоскости. Применение методов качественного и асимптотического анализа позволило расширить и углубить существовавшие представления о структуре нелинейных волн в средах со слабой дисперсией.

3. Составлена классификация решений обобщённого уравнения КП по типу соответствующих им фазовых траекторий.

4. Показано, что обобщённое уравнение КП имеет решения, соответствующие детерминированному хаосу (шумоподобным колебаниям).

5. Исследован динамический (детерминированный) хаос во временных рядах скорости западного и северного ветров в метеорной зоне D – слоя ионосферы. Вычислены стохастические характеристики временных рядов скорости ветра, такие как показатель Хёрста, корреляционная размерность, автокорреляционная функция. Построен график изменения показателя Хёрста для западного ветра. Анализ результатов позволяет делать выводы о структуре системы уравнений, описывающей внутренние гравитационные шумоподобные колебания. Соответствующая система уравнений относится к классу нелинейных диссипативных динамических систем с фазовым пространством размерностью $n > 3$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Тюнина С.Г. Качественный анализ обобщённых уравнений КдВ-типа // Межд. сотрудничество и образование молодёжи на Севере: Матер. I междунар. научно-прак. конф. студентов и молодых исследователей. Магадан: Изд. Междунар. педагогич. ун-та, 1996. С. 131-134.

2. Тюнина С.Г. Постановка задачи и методика качественного исследования обобщённых уравнений КдВ и КП //Идеи, гипотезы, поиск [Сб. эссе по материалам III научной конф. аспирантов МПУ].- Магадан: Изд. Междунар. педагогич. ун-та, 1996. Вып.III, ч.4. С. 29-30.

3. Белашов В.Ю., Тюнина С.Г. Качественный анализ и асимптотики решений обобщённых уравнений КдВ-класса // Изв.ВУЗов. Радиофизика. 1997. Т. XL, № 1. С. 328-344.

4. Тюнина С.Г. К исследованию обобщённого уравнения КП-класса, описывающего нелинейные волны в ионосфере // Северо-Восток России: Расшир. тез. докл. регион. науч. конф. Магадан, 1998. Т. 2. С. 220.

5. Тюнина С. Г., Тюнин О.Н. Метод оценки периодических зависимостей в дискретных измерениях// Северо-Восток России: Расшир. тез. докл. регион. науч. конф. Магадан, 1998. Т. 1. С. 284

6. Тюнина С.Г. Классификация состояний равновесия обобщённого четырёхмерного волнового уравнения.// Региональная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по физике. – Владивосток: Изд. Дальневост. ун-та. 2003. – С. 22.

7. Тюнина С.Г. Методы анализа решений обобщённых уравнений КП-класса.: Метод. пособ. - Магадан: Изд. СМУ, 2005. - 36 с.

8. Тюнина С. Г., Ишмуратов Р. А. Исследование динамического хаоса во временных рядах скорости ветра для нижней ионосферы.//Естественные и технические науки, № 1, 2008, С. 226-234

9. Тюнина С. Г. Классификация решений обобщённого уравнения Кадомцева-Петвиашвили для внутренних гравитационных волн.//Естественные

Список цитируемой литературы

1. *Кузнецов С. П.* Динамический хаос. М., 2001. -296 с.
2. *Сычёв В.* FRACTAN 4.4. <http://impb.psn.ru/~sychyov/fractan/fractan.zip>

Подписано в печать 28.10.2008 г.
Формат 60х84/16. Печ. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ 2196.

Издательство «Тровант»
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства «Тровант».
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д. 52.
Тел. (495) 334-09-67, (4967) 50-21-81
E-mail: trovant@ttk.ru, <http://www.trovant.ru/>

102